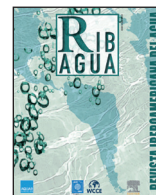




RIBAGUA

www.elsevier.es/ribagua



Artículo técnico

Restauración del río Besòs en Barcelona. Historia y lecciones aprendidas

J. P. Martín-Vide

Universidad Politécnica de Cataluña.



INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 03 de marzo de 2015

Aceptado el 06 de agosto de 2015

Palabras clave:

Restauración fluvial

Ingeniería de ríos

Hidráulica fluvial

Transporte sólido

Modelo físico

RESUMEN

Se describe la recuperación ambiental de un río urbano y torrencial que cruza el área metropolitana de Barcelona. Se repasa su historia, problemas ambientales, limitaciones de la restauración, diseño morfo-dinámico, estudios técnicos en modelo físico y de transporte sólido, aspectos sociales, y se hace una evaluación de la intervención doce años después de realizada.

© 2015 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Restoration of Besòs river in Barcelona. History and lessons learnt

ABSTRACT

The paper describes the environmental restoration of a torrential urban river flowing through the metropolitan area of Barcelona (Spain). An overview of the river history, environmental problems, constraints for the restoration, morphodynamical design, technical studies in a physical model, sediment transport and social aspects are presented. The restoration is assessed twelve years after its completion.

© 2015 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Keywords:

River restoration

River engineering

Fluvial hydraulics

Sediment transport

Physical model

1. Introducción: contexto urbano e hidráulico

El río Besòs cruza el norte del área metropolitana de Barcelona. Tiene una cuenca hidrográfica relativamente pequeña, 1.000 km². Estas circunstancias le marcaron un destino de profundo deterioro ambiental en la segunda mitad del s. XX, hasta el momento de la intervención de recuperación que se describe (1999). El objetivo de este artículo es presentar un caso de estudio de restauración fluvial que, pese a no ser típico ni modélico, puede contener algunas lecciones interesantes de orden hidráulico, morfológico y también ambiental y social, en parte gracias a la posibilidad de evaluar la intervención doce años después de ser inaugurada.

El área metropolitana de Barcelona creció rápidamente en población en los años 1955–1980 hasta unos 3 millones de personas. El desarrollo industrial de Cataluña atrajo a una gran masa de pobla-

ción del resto de España que abandonaba el sector agrícola. La urbanización más explosiva tuvo lugar en la periferia de Barcelona, como es el caso de los municipios de la cuenca del río Besòs. En la figura 1 se compara la superficie urbanizada en 1956 con la urbanizada en 2008. La industria, la vivienda, asociada al empleo y, en los últimos años, también la segunda residencia han transformado por completo la cuenca. Hacia 1980, el Besòs era un río extremadamente contaminado por los vertidos urbanos e industriales, en el que la depuración de aguas era aún un desiderátum. Entonces se puso en marcha un plan de saneamiento bajo la batuta de la Junta de Saneamiento de Cataluña, recién creada.

Decimos que el río Besòs, como otros ríos mediterráneos, es torrencial porque presenta caudales repentinos muy elevados, debido a precipitaciones intensas, de duración corta, pero suficiente para una concentración desfavorable de la escorrentía. También se entiende que es torrencial porque la pendiente es elevada (del 0,3% en la parte final) y el transporte sólido es muy abundante (de gravas

Correo electrónico: juan.pedro.martin@upc.edu.

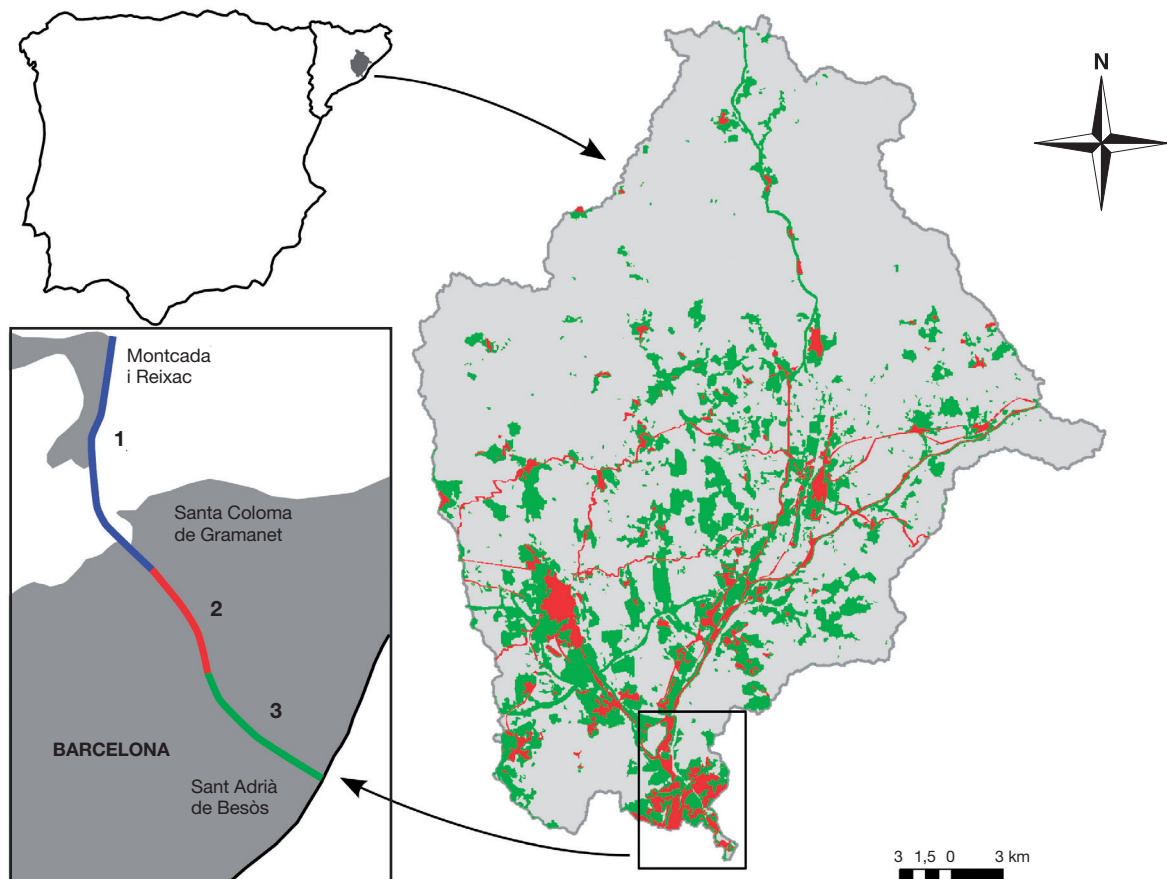


Figura 1. Derecha: cuenca del río Besòs, con más de dos millones de habitantes; en rojo, superficie urbana en 1956, en verde, nueva superficie urbana registrada en 2008. En la ampliación de la izquierda del cuadrado señalado, los tramos 1 y 2 de la restauración son los descritos en el texto.

con diámetro medio de 20 mm en este caso). En la época de más intensa urbanización de la llanura aluvial del Besòs, en buena parte construcción informal, ocurrió la avenida torrencial del 25 de septiembre de 1962 con pérdida de vidas humanas y grandes daños. Su caudal máximo quizá fue del orden de 2.000 m³/s; no hay datos instrumentales, sólo estimaciones basadas en los niveles máximos alcanzados en secciones erosionables sin límites fijos.

El río, en el área metropolitana, era originalmente de morfología ligeramente trenzada, a través de una llanura aluvial de unos 300 m de anchura. A raíz de la avenida de 1962, se proyectó una canalización consistente en un cauce de avenidas de 130 m de anchura con capacidad para 2.400 m³/s, limitado por muros de gravedad (o revestimientos de hormigón) por cuyo interior discurre un canal recto de 20 m (fig. 2). Esta obra, que respondía a una política de defensa de inundaciones basada exclusivamente en la capacidad hidráulica del río, fue inaugurada en 1975. La canalización del Besòs desencadenó la ocupación urbana y la ubicación de infraestructuras (carreteras y ferrocarril) junto al nuevo cauce, en terreno que, originalmente, era parte de la llanura de inundación. Es más, una línea eléctrica de alta tensión aprovechó el nuevo trazado para instalarse dentro del cauce de avenidas (fig. 2).

La crecida del 10 de octubre de 1994 se encargó de recordar el carácter torrencial del río, en particular, en qué poco tiempo se podía alcanzar la punta de la avenida: la superficie libre subió 3 m en poco más de 3 h (fig. 3). Su duración total, antes de la fase más lenta de recesión, fue de unas 24 h; la fase más intensa duró 5 h. En este

episodio, el caudal se estimó por medio de las medidas de nivel de la figura 3 en secciones con límites más fijos que en el pasado. El caudal quizá llegó a 1.150 m³/s. El período de retorno aproximado de este episodio, según los estudios hidrológicos [1], es algo superior a 50 años.

2. Motivación e impulso para la recuperación

La motivación para intervenir en el río Besòs fue, desde 1980, la calidad de las aguas, pues era uno de los ríos más contaminados de Europa. Esta motivación objetiva prendió fuertemente en las asociaciones locales, vecinales y ecologistas, que transmitieron su impulso a la administración municipal, creándose una entidad supra-municipal: el Consorcio para la Defensa de la cuenca del río Besòs para tratar con la Junta de Saneamiento (luego Agencia Catalana del Agua) las demandas del grupo de municipios. Desde el punto de vista social, el área próxima al río Besòs, donde viven unas 300.000 personas, es una de las más deprimidas en cuanto a nivel de renta, de las más sacrificadas por el paso de infraestructuras y de las más necesitadas de zonas verdes de toda el área metropolitana de Barcelona. Este movimiento colectivo de los municipios por la calidad del agua tenía un antecedente de éxito en la Costa Brava de Cataluña.

El caudal medio del río Besòs es de 3,9 m³/s, pero con grandes fluctuaciones, ya que no existen embalses de regulación. En estiaje (verano) el río quedaría seco. Como unidad hidrológica, la cuenca es

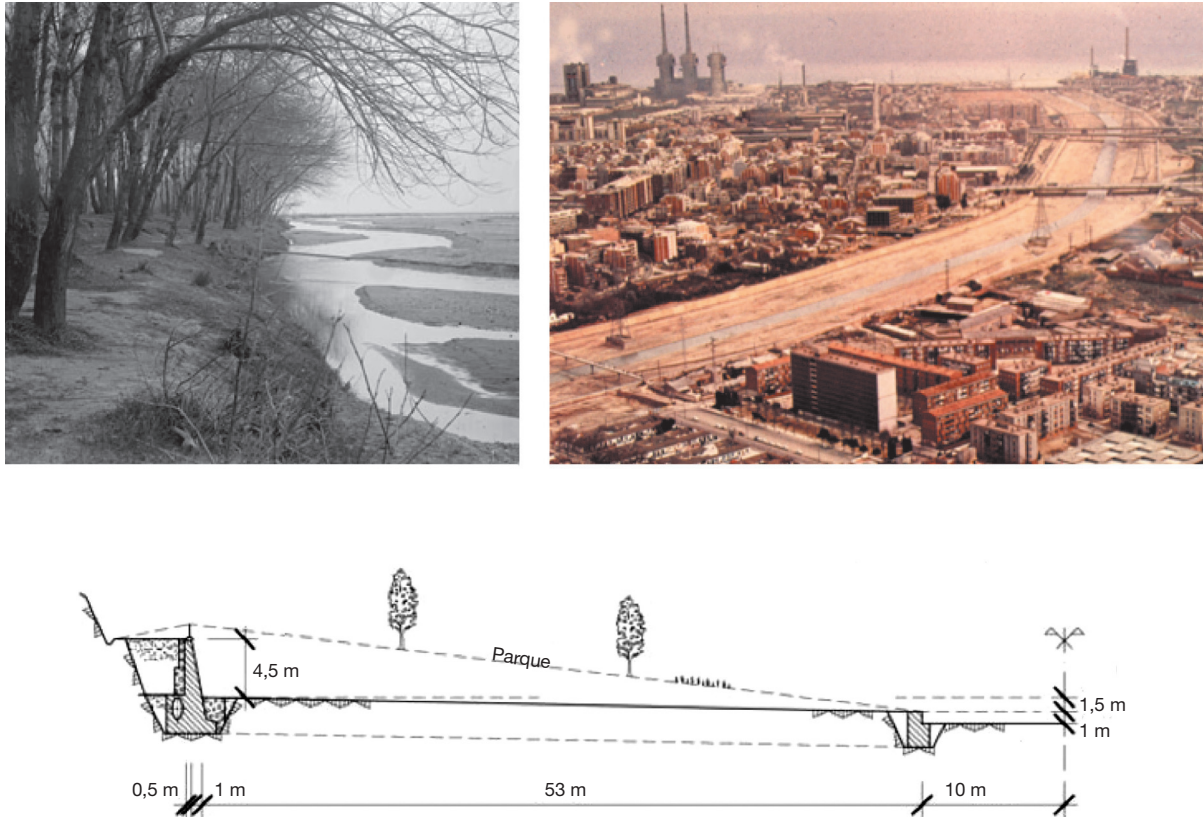


Figura 2. Arriba izquierda: el cauce del río con tendencia trenzada divagante en una foto de fecha desconocida (primera mitad del s. xx). Derecha: canalización inaugurada en 1975 en una vista aérea. Obsérvese la industria, la ocupación urbana incipiente, la línea eléctrica y el nuevo cauce. Abajo: sección tipo. Se dibuja también una propuesta anterior de rehabilitación ('Parque') rechazada por la pérdida de capacidad.

deficitaria. La población (más de 2 millones) es abastecida desde otras cuencas, de modo que la descarga de agua residual, urbana e industrial, regular y del orden de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, constituye una parte sustancial del caudal total del río o incluso el único caudal en estiaje. Esta era una de las causas de la pésima calidad del agua (nutrientes, materia orgánica, etc.) y de las consecuencias más aparentes para la población como olores y espumas.

Además de tratar con la administración de Cataluña, el "Consorcio" se dirigió a Europa en enero de 1996, en nombre propio y de la entidad metropolitana a la que Barcelona da nombre, pidiendo fondos de protección ambiental (FIMMA), que eran parte de los Fondos de Cohesión de la UE para el saneamiento de las aguas y el tratamiento de los suelos en un tramo de 6,2 km del río Besòs. En diciembre de 1996, se aprobó el proyecto por valor de 20 millones de euros, pagado en un 80% por la UE y en un 20% por los municipios según su población (por tanto, la ciudad de Barcelona pagaba la mayor parte de este 20%). Vale la pena recordar que Barcelona, al organizar los Juegos Olímpicos de 1992, había dejado un gran cinturón viario como frontera de la ciudad con el río. El destino lógico del río, como ha pasado en España con otros ríos urbanos en mal estado, habría sido su progresivo deterioro ambiental a espaldas de la gran ciudad, hasta que, quizá un día, surgiera la propuesta de cubrirlo para dejar de verlo. Sin embargo, la sintonía entre todos los municipios inclinó la balanza hacia la recuperación ambiental, de la que serían principales beneficiarios los municipios de Santa Coloma, Montcada y Sant Adrià (fig. 1), cuyos centros de gravedad se encuentran, a diferencia de Barce-

lona, al lado mismo del río. La agencia Barcelona Regional creada por Barcelona y estos municipios iba a ser responsable del desarrollo del proyecto.

3. Limitaciones de la restauración

El objetivo principal de la recuperación aprobada y financiada era la mejora de la calidad del efluente de la estación depuradora más cercana (Montcada) mediante la técnica de humedales construidos (*constructed wetlands*), instalados en el cauce de avenidas del río Besòs. Es interesante, antes de seguir, que contrastemos el proyecto con algunos conceptos básicos de restauración.

En el momento de los primeros planes concretos del proyecto (1997), era ya inviable una vuelta atrás de la canalización de 1975, que había dejado un corredor fluvial de sólo 130 m de anchura como cauce de avenidas, pues la urbanización consiguiente estaba consolidada. El nombre de la intervención era "Recuperación medioambiental", entendiéndose que los fines eran recuperar características más naturales con agua más limpia, dentro del corredor fluvial disponible. La preocupación por la inundación de un área muy poblada no había desaparecido, como se había encargado de recordar la avenida de 1994. La canalización de 1975 había cumplido su importante función de defensa, sin perjuicio de que podamos criticarla hoy como actuación "dura". El riesgo de inundación, en realidad, no ha hecho más que aumentar desde 1956 hasta hoy si observamos el aumento de la urbanización

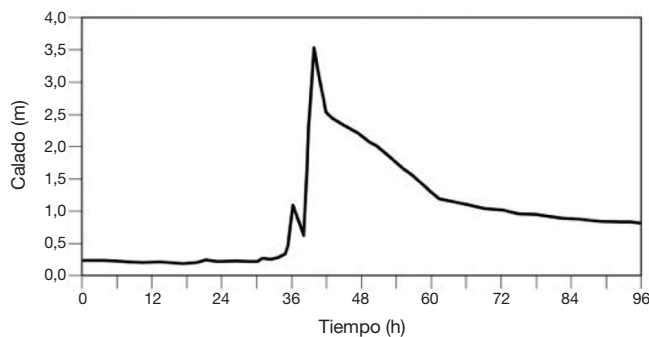


Figura 3. Arriba: Foto del flujo de la avenida del 10 de octubre de 1994, en dirección desde el fondo hacia el primer plano. El muro de la margen derecha (izda. de la foto) limita con el anillo o cinturón viario de Barcelona (1992). Abajo: Diagrama de niveles de la misma crecida.

(fig. 1) y con ella la impermeabilidad de la cuenca y de ahí el aumento de la escorrentía.

Esto último nos lleva al punto de que los ríos son sistemas dinámicos que responden a las entradas de agua y sedimento de la cuenca. Si por un lado la escorrentía (agua) ha aumentado, se puede añadir que las fuentes de sedimento han disminuido, ya que grandes superficies naturales de la cuenca, más o menos susceptibles de entregar partículas, se han convertido en superficies urbanas no erosionables. Además, las anchuras de los cauces aluviales se han reducido con canalizaciones. El perfil del río Besòs puede estar en desequilibrio por esta doble causa: la cuenca da más agua y también menos sedimento. De hecho, parece que ha habido un proceso de erosión general del lecho desde 1975 [2]. Para detenerlo, se construyeron un buen número de umbrales de fondo (traviesas) que, poco a poco, han producido un perfil longitudinal del fondo escalonado, que no se deseaba (fig. 4). Además, cuanto menor es la distancia entre traviesas, menor es la pendiente entre ellas [3]. Por tanto, si las condiciones de equilibrio han cambiado, ¿cuál debería ser la imagen de referencia de una restauración más radical, que trascendiera las limitaciones impuestas, limitación de anchura por los muros de la canalización, de perfil por las traviesas, buscando la vuelta a un estado más natural del río? No lo sabemos.

En los primeros pasos del proyecto, las células de humedal construido iban a ser colocadas en las llanuras a ambos lados de un “cauce de aguas bajas”, recto y centrado en el cauce de avenidas. Esto significaba prolongar una sección como la de la figura 2, con su cauce central fijo, en 4,2 km hacia arriba donde no existía tal cauce. Los restantes 2,0 km (el total es de 6,2 km) pertenecían al tramo canalizado de la figura 2. Con esta organización del espacio se conseguía una superficie de 14 ha de humedal construido. El objetivo de maximizar la depuración de las aguas colisionaba, de esta manera, con la dinámica fluvial, que aconsejaba un cauce sinuoso libre

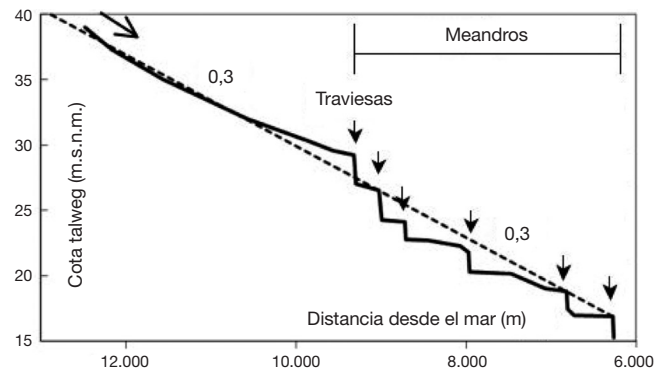


Figura 4. Perfil longitudinal del río antes de la intervención, escalonado por traviesas que denuncian una erosión general (véase la pendiente media de 0,35%). Se señala la parte superior de la intervención a lo largo de un tramo equivalente a 3 km (Montcada), cuya planta se da en la figura 5. La abscisa tiene origen en el mar.

en lugar de uno recto y centrado. A pesar de que la morfología original del Besòs era ligeramente trenzada, un cauce meandriforme podía mejorar el hábitat para la flora y la fauna. Como río de gravas, las barras alternadas, la secuencia de rápidos y remansos y otros rasgos morfológicos podían ser beneficiosos en cuanto a naturalización. Así pues, la posición era dar al río formas naturales, compatibles con las restricciones, aunque no fueran las originales, aplicando una visión pragmática de la restauración, máxime cuando era inviable recuperar anchura y había dudas sobre el equilibrio del río debido a los cambios en la cuenca. Una consecuencia de esta sinuosidad fue, no obstante, la pérdida de área de humedal, de 14 a 10 ha, en la misma longitud de río, lo cual fue finalmente asumido por la agencia Barcelona Regional.

Es interesante señalar que decisiones como esta (y muchas más) fueron tomadas por esta agencia, que desarrollaba el proyecto (ideaba, proyectaba, licitaba y ejecutaba), es decir, por un grupo de técnicos que satisfacían las expectativas de unas autoridades políticas, elegidas democráticamente. El concepto de participación ciudadana no se aplicó ni era entonces obligado; recordemos que la Directiva Marco del Agua de la UE fue aprobada en octubre de 2000 y traspuesta a la legislación española en diciembre de 2003. No obstante, el fuerte impulso municipal en la base de este proyecto aseguraba que la intervención reflejaba las demandas de la mayoría de la población que vivía cerca del río.

Sin embargo, este impulso municipal puede considerarse en el origen de una debilidad del resultado final. Es llamativo en el río Besòs su división en dos tramos: 4,2 km de cauce sinuoso con humedales, seguido aguas abajo por 2,0 km de río recto convertido en un parque urbano (fig. 1, zonas 1 y 2). Es cierto que antes de 1999 también existían los dos tramos, ambos de 130 m de anchura, el superior sin cauce central recto, pero sus diferencias son ahora más marcadas. Los municipios ribereños, Montcada y Santa Coloma, tenían demandas diferentes. El primero pidió la mejora del medio ambiente fluvial en cuanto a calidad del agua y naturalidad, pero no el uso ciudadano del cauce. El segundo, por el contrario, deseaba fervientemente ver el cauce de avenidas limpio, accesible y transformado en un parque urbano, ya que había una falta absoluta de zonas verdes en la población. Dado el origen municipal del proyecto, estas diferencias se atendieron puntualmente, aumentando el contraste entre los dos tramos. Una evaluación objetiva de la restauración del río Besòs por una persona que no conozca la historia se enfrenta hoy a la pregunta: si el problema era el mismo en los 6,2 km, ¿por qué la respuesta fue tan distinta? o ¿tiene sen-

tido para la continuidad del río una segregación de usos y funciones que separa de tal manera la depuración con humedales y el parque urbano?

Finalmente, volviendo al principio, la necesidad de instalar un humedal de depuración en el propio lecho de avenidas del río, acción comprometida por la financiación europea, es quizá el rasgo más chocante, menos típico y en absoluto ejemplar, del proyecto. Hay coincidencia en que siempre hubiera sido mejor tener el humedal fuera del cauce, debido al riesgo de las avenidas. De esta incertidumbre arrancaron los estudios hidráulicos que se describen más adelante. No obstante, a la hora de la recepción de los trabajos, lo que la UE esperaba era un volumen de agua depurado y una superficie de suelo recuperado.

4. Aspectos de morfología fluvial

La morfología de las formas en planta y en sección transversal de un río de gravas intervino en el proyecto del cauce principal sinuoso del tramo superior. Con los datos disponibles, el caudal dominante, según criterios hidrológicos, debía estar dentro de la horquilla 34–59 m³/s correspondiente a los días 1.º y 2.º de la curva de caudales clasificados. Por otra parte, la capacidad del cauce principal en estado inalterado, con medidas tomadas in situ, en régimen uniforme, resultó de 54 m³/s. Este es el caudal de desbordamiento o caudal de cauce lleno, también conocido como *bankfull*. Como este caudal queda dentro de la horquilla anterior y como su periodo de retorno viene a ser de 2,4 años, cifra que cae dentro del intervalo típico en ríos mediterráneos que es de 1 a 7 años, se adoptó 54 m³/s como caudal dominante [4]. Con este punto de partida, la teoría del régimen para ríos de grava, particularmente de Altunin [5], se comparó con las dimensiones reales del cauce y, de este modo, se concluyó que el cauce principal más apropiado debía ser de 30 m de anchura y 1 m de profundidad.

A continuación, se usaron, para la planta del cauce, expresiones empíricas del curso en planta de ríos meandriformes [6]: la longitud de onda del eje es diez veces la anchura (30 m) y su amplitud, tres veces la anchura. En cuanto a la amplitud posible, de los 130 m de anchura aluvial del cauce de avenidas hubo que excluir dos franjas de 30 m cada una, junto a los muros, como reserva de espacio para servicios existentes y conducciones de agua a los humedales. Las longitudes de onda quedaron finalmente comprendidas entre 320 y 920 m, porque se adaptaron a las alineaciones del cauce de avenidas, en el sentido de que los signos de la curvatura del cauce de avenidas y del cauce principal fueran el mismo en las curvas del primero (es decir, ambos cauces girando a la izquierda, fig. 5). La curvatura del cauce principal y el ángulo entre éste y el eje del cauce de avenidas se mantuvieron relativamente pequeños en comparación con los meandros libres de la bibliografía. Esta fue una medida de precaución, pues hay que reconocer que el río canalizado en 1975 ya no tiene 300 m de anchura, de modo que el flujo se presenta hoy mucho más concentrado. Esto implica mayores profundidades, velocidades y caudales unitarios que en el pasado, lo cual podría hacer peligrar la estabilidad de un cauce demasiado sinuoso.

Conforme a un concepto más natural para el río, las orillas de este cauce principal sinuoso no fueron revestidas ni defendidas. Se había observado que este cauce podía ser estable en tamaño y forma, aunque quizá migraría como cauce meandriforme, ya que el transporte sólido de fondo es abundante. Por ello, debido a las inversiones en las células de humedal, se decidió colocar unas protecciones en zanja de escollera enterrada, en la parte exterior de las curvas del cauce, en la posición extrema admisible para no afectar a los servicios y conducciones enterrados. Por su parte, las traviesas de hormigón existentes (figs. 4 y 5) eran incompatibles con el nuevo cauce, que no debía tener saltos. Se eliminaron, pero para asegurar que la posible erosión general del lecho no quedaba sin freno, se sustituyeron por traviesas de escollera enterradas coincidiendo con los puntos de inflexión del

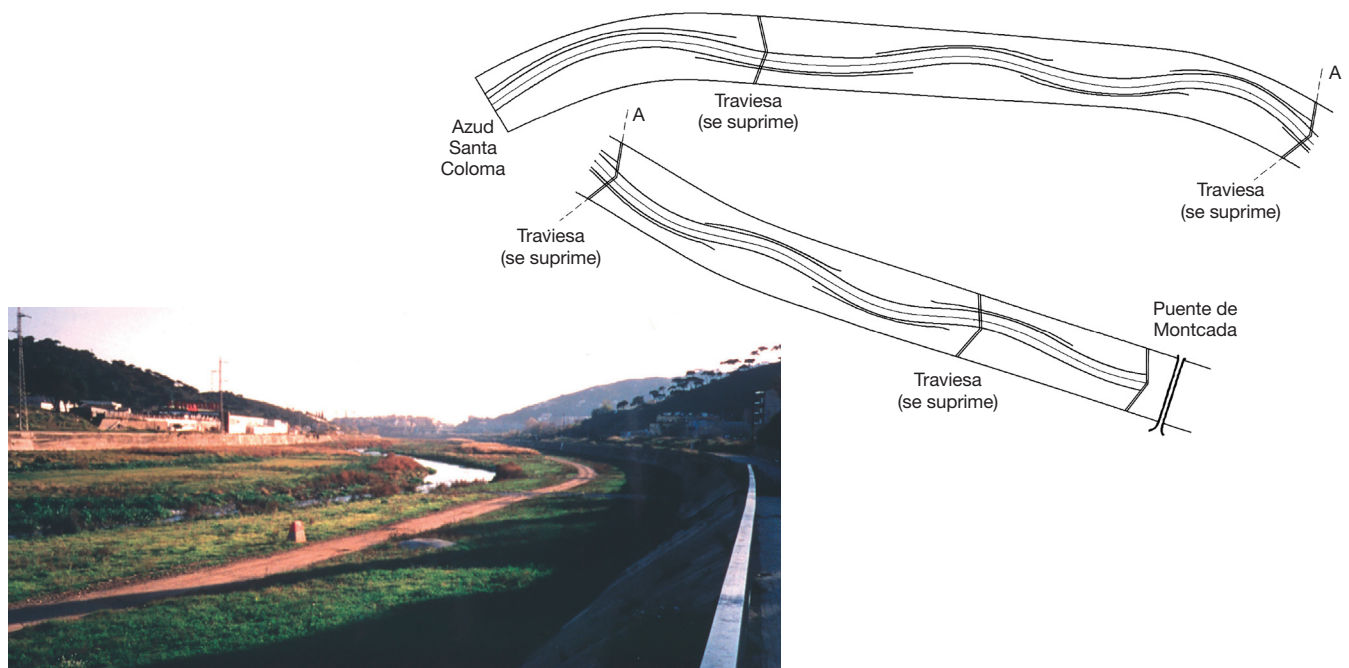


Figura 5. Trazado del cauce principal sinuoso de 30 m en la mayor parte del tramo superior (dibujado en dos fragmentos unidos en A), el mismo de la figura 3, entre dos muros del cauce de avenidas distantes 130 m. Flujo de derecha a izquierda. Se señalan las protecciones de escollera enterradas en el exterior de las curvas y las traviesas que deben demolerse (la última es un azud). Los humedales (9 ha) ocupan los espacios libres en las llanuras. Abajo: foto del natural mirando aguas abajo, en invierno de 2000, tras la siega de las parcelas (se ve una en el interior de la curva, que es margen izquierda del río).

curso. Se dispusieron otras protecciones enterradas en escollera a modo de espigón, a media distancia entre cada dos traviesas.

Explicamos, en un inciso, que una célula de humedal recibe por bombeo el efluente salido de la planta de tratamiento. El caudal de agua (total de 0,3-0,4 m³/s) circula en flujo horizontal a través de un sustrato permeable de unos 0,6 m de espesor. Este sustrato, de partículas de tamaño 8-25 mm seleccionadas entre las gravas del río, alimenta el crecimiento de una vegetación autóctona que toma los nutrientes del agua en su metabolismo. La especie elegida fue *Phragmites australis* (carrizo), una fina caña muy flexible de hasta 2 m de altura, que se extiende rápidamente, forma masas de gran densidad y se seca en invierno, momento apropiado para segarla y llevarse así los nutrientes de las aguas residuales. Se introdujeron también pequeñas zonas de enea (*Typha angustifolia*).

Se cuentan, en total, 60 celdas (células), distribuidas a lo largo de 3,2 km de río (total 10 ha). La celda más frecuente tiene dimensiones de 50 m × 21 m. Todas tienen contornos sólidos de hormigón. Su fondo, con una ligera pendiente transversal, se impermeabiliza con arcilla (o en algún caso con caucho). Las celdas se agrupan de distintas maneras para ocupar el espacio disponible; la forma de las exteriores se adapta a los meandros del cauce principal. Cada grupo de celdas tiene una válvula reguladora del caudal, situada en una arqueta lejos del cauce, una tubería de distribución, una de drenaje y una arqueta de salida del agua al río.

En el proyecto del cauce principal del parque urbano (tramo inferior) no se dejó intervenir a la morfología fluvial. Más bien, se siguió un principio a priori de ordenación del espacio, que concedía 1/3 de anchura al agua en el centro y la remansaba con pequeñas presas para que ocupara todo ese espejo de agua. Estas presas son inflables, de modo que se desinflan en caso de avenida (fig. 6). El cauce central de la figura 2 se ensanchó y profundizó, con el objetivo expreso de mantener más tiempo la hierba del parque libre del desbordamiento para comodidad de los visitantes, lo que es contrario a los

principios de la morfología fluvial. Concretamente, la capacidad de este cauce es de 180 m³/s, es decir, más del triple de la capacidad del cauce sinuoso (caudal dominante o de cauce lleno de 54 m³/s). En este cauce, se ha observado, claramente, una acumulación de gravas (fig. 6), lo que se puede explicar, precisamente, por su exceso de capacidad antes del desbordamiento. El desinflado de las presas tiene el objetivo de arrastrar las gravas.

Se construyeron accesos al parque en escalera y en rampa. El parque constituye la imagen más conocida y publicitada, y el mayor éxito de opinión pública, del nuevo río Besòs (fig. 6). No se permiten actos multitudinarios, ya que la torrencialidad del río obliga a garantizar la evacuación de todas las personas en 15 min. Se instaló un sistema de información hidrológica en tiempo real, con alarma, luminica y sonora, para la evacuación del parque en caso de una avenida súbita. Este sistema tiene su punto de medida de caudal a 3 km aguas arriba. Gracias a él, se sabe que la velocidad de una onda de avenida moderada es equivalente a 5,5 km/h. Desde la inauguración del parque en 1999, ninguna crecida ha sido comparable a la de 1994 (fig. 3).

5. Estudios hidráulicos en modelo reducido

El Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) fue consultado, en el bienio 1997-99, a propósito del cauce meandriforme, en primer lugar (fig. 5), y también sobre el riesgo que soportarían los humedales en avenida y el efecto de la nueva vegetación en la capacidad hidráulica del río. Desde la UPC, la actitud en favor del proyecto, en tanto que restauración pragmática, contribuyó a un debate en el que la posición de muchos ingenieros hidráulicos, alertando sobre la capacidad de desagüe y la seguridad ante avenidas, se hallaba muy lejos de la visión de los técnicos promotores, principalmente biólogos y arquitectos.



Figura 6. Arriba: aspectos del parque urbano (septiembre 2011) y de los accesos. Comparar con el estado anterior (figura 2). Abajo: una presa inflada y la acumulación de grava en el cauce central demasiado grande, bajo la influencia de una presa.

La evaluación del riesgo y del efecto de los humedales se hizo con trabajo experimental de campo y de laboratorio. En primer lugar, se estudiaron los carrizales del área mediterránea en ensayos de laboratorio. Unas masas de planta recién arrancadas se desplazaban a velocidad constante por un canal de agua quieta (ensayos realizados por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas [CEDEX]). Mediante la flecha observada, se determinaba la densidad y rigidez del carrizal. Más exactamente, estos parámetros mecánicos, rigidez y densidad, en forma de producto determinan la resistencia al flujo del carrizal. En efecto, el producto mEI , o sea densidad \times rigidez, donde m : densidad (número de plantas/m²), E : módulo de elasticidad, I : momento de inercia (EI : rigidez), conduce a la resistencia al flujo de plantas flexibles. Según Kouwen [7] el grado en que las plantas flexibles se doblan ante una corriente y, por tanto, también la altura doblada, depende del inverso de mEI , como resistencia, y de la profundidad y velocidad como acción del flujo.

El carrizo desarrolla formaciones con una densidad del orden de 1.000 plantas/m² y los ensayos mecánicos dieron $EI \approx 5 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ (el tallo tiene un diámetro exterior de 8 mm e interior de 6 mm) [4]. Aplicando el método empírico de Kouwen, resulta un coeficiente de rugosidad n de Manning que va de 0,065 a 0,045, según el valor de la acción hidráulica en el río Besòs, valorada por el producto velocidad \times profundidad, o sea caudal unitario. A mayor caudal unitario menor coeficiente de Manning. El procedimiento es iterativo, pues la velocidad y la profundidad aparecen para caracterizar la acción del agua, pero también son resultado del cálculo.

También se ensayó la resistencia del carrizo al arranque, aplicando una fuerza de tracción en la raíz. Esto se hizo en campo bajo condiciones controladas en parcelas experimentales, cuyo objetivo principal era verificar el poder depurador del humedal. También se hizo el ensayo de arranque con carrizo silvestre. Pese a la dispersión de resultados, debida a las edades de la planta, estación del año, tipo de suelo, nivel freático, etc., se puede dar un valor de 30 kg para esta resistencia, mayor que la fuerza de arrastre que sufre la planta en avenida. Así, el carrizo sólo sería arrancado si una formación resultara aislada y socavada a todo su alrededor. Por ello, la mejor protección de las células de humedal (sus contornos, arquetas, etc.) frente a las avenidas es precisamente extender la misma vegetación más allá de sus límites.

En laboratorio, se realizaron dos modelos físicos a escala reducida de un tramo meandriforme de 1.400 m de longitud (fig. 7). El tramo estudiado en ambos modelos es la mitad de aguas abajo representada en la figura 4, que es también la parte superior del esquema en planta de la figura 5. La escala general, horizontal, que determinaba el espacio ocupado por el modelo no podía ser mejor que 75 (1:75). En la escala vertical, era necesaria una distorsión para

mejorar la precisión de las medidas de nivel de agua (el principal objetivo del modelo), ya que se tenían profundidades solamente de 5 m en el prototipo (el río Besòs). Con la distorsión también se aseguraba un régimen turbulento más desarrollado en el modelo. La escala vertical elegida fue 30 (1:30) y, por tanto, la distorsión 2,5 ($=75/30$). La pendiente queda exagerada 2,5 veces igual que las dimensiones verticales. Estas exageraciones deben ser compensadas por un aumento de rugosidad del lecho con respecto al modelo no distorsionado, tal que levante el perfil de agua en el caso distorsionado. La teoría de la semejanza da la escala del coeficiente de rugosidad de Manning en un modelo con distorsión, que vale en este caso $30^{1/6} / 2,5^{1/2} = 1,11$, o sea, curiosamente un coeficiente de rugosidad muy semejante al del río, lo que se puede conseguir si se usa material granular en el lecho con una grava $\approx 20 \text{ mm}$, o sea, una grava no tan diferente de la del río. Esta grava se usaba en el lecho del primer modelo y no es movida por el flujo. Se trata de un modelo de lecho fijo (fig. 7).

La representación de las plantas en los modelos, decisiva para la resistencia al flujo total y, por tanto, para el nivel de agua, era más compleja. Por razones prácticas, solo se podía pensar en plantas artificiales para representar el carrizal, no en plantas vivas. Según la teoría de la semejanza y el método de Kouwen [7], que involucra la flexibilidad de plantas, el producto mEI se debe reducir tanto como la escala geométrica (vertical) elevada a 5. Por ello, era imposible encontrar plantas artificiales tan flexibles si el modelo no tenía distorsión. La distorsión, por fortuna, hizo posible el empleo de plantas artificiales comunes para representar el carrizal. Plantas de distinta rigidez, altura, ramificación y en distinta densidad se ensayaron en un canal recto de laboratorio hasta alcanzar los coeficientes de rugosidad 0,045 – 0,065 del carrizo en el prototipo (el río) (fig. 7).

El primer modelo, en lecho fijo, permitió comparar los perfiles de la superficie del agua antes y después de la restauración y concluir que, para mantener el mismo grado de seguridad frente a inundaciones en el río Besòs, era necesario recrecer 70 cm los muros construidos en 1975, ya que el carrizal incrementaba apreciablemente la resistencia al flujo. El modelo permitió comparar dos estados, anterior y posterior, pero no dar respuestas absolutas por falta de datos hidráulicos reales del Besòs para calibrar el modelo, es decir, datos de caudal y altura de agua simultánea e independientemente.

El segundo modelo fue en lecho móvil con alimentación continua de arena. Todo el río, no sólo el cauce principal sinuoso, sino también las llanuras con carrizal, era erosionable. La cantidad de material que necesitaba el modelo exigió la recirculación de la arena, con bombeo, separación y dosificación, controlada por maquinaria de manejo de sólidos. El material era arena gruesa 1-2 mm, que respetaba la igualdad del parámetro adimensional de Shields



Figura 7. Izquierda: vista del primer modelo físico, de lecho fijo, mirando aguas abajo (el de lecho móvil se adivina a su derecha). El tramo estudiado es aproximadamente la mitad de las figuras 4 y 5-arriba (del azud hasta cerca de A). A la derecha: foto de las plantas de plástico que representan el carrizal, ensayadas en canal recto para determinar su resistencia al flujo.

entre modelo y prototipo. Este modelo, por comparación entre antes y después de la restauración, probó que los humedales tienen tendencia a la sedimentación, mientras las áreas desprovistas de vegetación tienen tendencia a la erosión. Se advirtió de la necesidad de mantenimiento futuro de los humedales tras las crecidas, ya que se depositarían en ellos materiales finos en pequeñas crecidas y de mayor tamaño en grandes crecidas. Tampoco, en este caso, hay datos reales del río Besòs en cuanto a transporte sólido y erosión o sedimentación.

Más detalles sobre los modelos, la semejanza y sus resultados se encuentran en Martín-Vide [2]. Los datos del modelo de lecho fijo han servido para una línea de investigación de la UPC en cauces compuestos (formados por cauce y llanura), sinuosos y con vegetación flexible [8,9].

6. Historia de la restauración de 1999 a 2011

En este apartado, hacemos una pequeña historia de la restauración del río Besòs a lo largo de los últimos 12 años. En diciembre de 1998, aún durante las obras, una avenida pequeña con una altura de agua del orden de 30 cm sobre las llanuras dejó limo en las primeras parcelas de humedal (aguas arriba), pero no arrancó el carrizal en general, pese a llevar plantado solo 5 meses y ser invierno. Una protección de escollera enterrada en curva (fig. 5) quedó a la vista. Las observaciones sobre el depósito de limo y el corrimiento del cauce en curvas anunciaban los asuntos principales del comportamiento de este cauce sinuoso con vegetación en los siguientes doce años.

El 23 de abril de 1999 la “recuperación medioambiental” del río Besòs, que incluía el parque urbano, llamada entonces fase I, fue inaugurada por las autoridades, con gran audiencia pública y repercusión en los medios de comunicación [10]. En febrero de 2000, Barcelona Regional comenzó el proyecto de prolongar el parque urbano hasta el mar (fase II), en sus últimos 2,7 km, para beneficio de la población de Sant Adrià (se trata de la zona 3 en la izquierda de la figura 1). Se siguió el mismo tipo de sección con un gran cauce central, llanuras con césped y presas inflables. Con esta ampliación, inaugurada en marzo de 2004, se llegó a 26 ha de parque urbano, 5,5 km de carril para bicicletas, 19 accesos de público (rampa y escalera) y 11 remansos formados con presas inflables. El presupuesto total de las dos fases fue de 37,5 millones de euros y, por lo que se refiere al parque urbano, el retorno de esta inversión se puede medir por la cifra de unos 150.000 visitantes al año. En el ambiente especial de la desembocadura, presidido por una gran barra aluvial cuyo lado exterior es la playa del mar, se proyectaron plantaciones de vegetación autóctona. Esto suscitó, de nuevo, preguntas sobre

capacidad hidráulica y riesgo para la vegetación en avenidas, que la UPC respondió mediante un modelo físico en lecho fijo de la desembocadura (2004). También en 2004, por convenio con la empresa eléctrica Endesa, se consiguió la retirada de las torres eléctricas, huéspedes no deseados del río desde 1975.

Las ortofotos del Instituto Cartográfico de Cataluña (entre 2002 y 2008) han permitido estudiar la evolución del cauce sinuoso en estos años. La anchura aluvial de hoy sigue estando alrededor de 30 m, como se proyectó el cauce en su día, con una fluctuación debida a que las crecidas despojan las barras de grava de la vegetación que las va colonizando. El eje del cauce se ha desplazado un poco (como máximo 8 m), en parte a causa de las fluctuaciones de anchura. Lo más destacado, sin embargo, es la migración de los meandros hacia aguas abajo: los ápices de las curvas se han desplazado incluso 35 m. Por ello, las 9 protecciones de escollera enterradas estaban ya a la vista en 2006, una de ellas perdida (flanqueada por el agua). Así, las protecciones han frenado la profundización de los meandros, pero han resultado cortas (aguas abajo) para frenar la migración. La movilidad de los meandros está relacionada, como causa o como efecto, con el transporte sólido del río. De las 9 traviesas enterradas en los puntos de inflexión, una era visible ya en 2000 y en 2008 eran visibles cuatro, lo que prueba que el cauce padece una erosión general a largo plazo.

En el periodo del estudio evolutivo, el máximo de caudal medio diario no ha pasado de 87 m³/s, pero los caudales punta han sido, sin duda, bastante mayores. Por ejemplo, en 2011 se han podido observar dos crecidas con caudales máximos estimados de 170 m³/s (15 de marzo, caudal medio 51 m³/s) y 200 m³/s (30 de julio) [1]. La figura 8 muestra el flujo desbordado, gobernado por la corriente sinuosa, en este último episodio. La avenida dejó un cauce limpio de unos 30 m de anchura y respetó, en este caso, la protección de orilla en el exterior de la curva (no enterrada, sino ya vista desde tiempo atrás).

Todo lo anterior son acciones menores en comparación con la que parece haber sido la mayor crecida, la madrugada del 15 de septiembre de 1999, pocos meses después de la inauguración. La altura de agua sobre las llanuras fue del orden de 1 m y el caudal máximo estimado 600–700 m³/s. Los estudios hidrológicos indican que el periodo de retorno de un suceso de esta magnitud es de 25 años [1]. Los elementos estructurales del parque urbano (muros, presas inflables, accesos, etc.) no sufrieron daño; el césped del parque resultó dañado solo muy localmente. Todas las masas de carrizo en los humedales resistieron sin ser arrancadas, plegándose el carrizal al paso del agua. Hubo un transporte sólido cuantioso y depósitos de material sólido menos fino en todas las parcelas, sobre todo las de aguas arriba. Al menos dos protecciones de escollera enterradas quedaron a la vista. El cauce migró como hemos explicado y el con-



Figura 8. Izquierda: foto durante el paso de la avenida del 30 de julio de 2011 (caudal máximo 200 m³/s, en la foto 100 m³/s), y derecha: pocos días después desde el mismo punto, cerca de A (figura 5) y mirando aguas abajo.

torno de una célula quedó destruido. Se comprobó que algunas erosiones locales estaban vinculadas a elementos rígidos del cauce de 1975 que no habían sido demolidos: las dos primeras traviesas aguas arriba (fig. 5, habiéndose construido recto el cauce entre ellas), un desagüe y al menos un espigón, todos de hormigón. Muchos flotantes, vegetales y basura, ensuciaban todo el río. En este momento crítico, se siguió con determinación apostando por el nuevo río Besòs. No podemos olvidar que esta crecida estaba aún lejos de los $1.150 \text{ m}^3/\text{s}$ de 1994.

7. Estudio de transporte sólido

El transporte sólido, muy abundante en el río, se ha manifestado en la acumulación de gravas en el cauce del parque urbano y en la movilidad observada en los meandros del cauce natural, ya sea su causa o su efecto. El volumen sólido que llegue a la desembocadura influirá en su medio ambiente y en la barra litoral. Por estas razones, se juzgó interesante estudiar el transporte sólido del río, a falta de casi cualquier dato de esta clase, excepto la granulometría de los cauces. En este estudio, se contó con la colaboración de la University of Illinois at Urbana-Champaign.

El estudio se limitó al material con origen en los cauces (el material con origen en la cuenca o carga de lavado estaba excluido). La morfología de la cuenca del Besòs (1.019 km^2) es particular, porque prácticamente toda la escorrentía llega al río desde las cuencas del norte por medio de cinco grandes afluentes (fig. 9). De hecho, la unión de los dos primeros por el este (Mogent y Congost, 180 y 225 km^2 respectivamente) forma el Besòs. Desde ahí, el río canalizado a lo largo de 9 km recibe, como un colector, los otros tres afluentes (Tenes, Caldes y Ripoll, 199 , 151 y 224 km^2) y, desde el último, quedan otros 9 km de río canalizado, justamente las fases I ($6,2 \text{ km}$) y II ($2,7 \text{ km}$) de la restauración, que son como un pasillo o emisario hasta el mar, sin apenas cuenca hidrológica asociada.

El estudio del transporte con origen en el cauce se fija en estos 18 km de río Besòs, colector y emisario, dividido en tramos homogéneos, más los 2 km finales de cada uno de los cinco afluentes, de todos los cuales se conoce bien la granulometría (fig. 9). Se supone que el recorrido del material del cauce durante un episodio no es superior a estas distancias, por ejemplo, que no recorre más de 10 km en una decena de horas, tomando esta duración como característica de un fenómeno importante, como muestra el hidrograma de la figura 3. Se trata, pues, de transporte de fondo que viaja más des-

pacio que el agua. De esta manera, el cálculo empieza en las desembocaduras de los afluentes, que aportan al río Besòs tanto volumen sólido (dividido por fracciones: arena, grava, etc.) como son capacidades. Esto se llama transporte según capacidad. En los siguientes tramos se aplica el principio de que el transporte es la cifra menor entre la capacidad de transporte y el suministro desde el tramo superior, haciéndolo fracción por fracción. A través de la red hidrográfica descrita y para avenidas de varios períodos de retorno, se trasladan por fracciones los volúmenes transportados. La fórmula de capacidad de transporte usada es la de Parker, en particular mediante los códigos Acronym 1 y 2. Más información en UPC [11] y Martín-Vide [4].

Una avenida de 25 años de periodo de retorno daría un volumen de 5.000 a 10.000 m^3 de arena y grava, circulando por los cauces hasta la desembocadura; una de 100 años de 15.000 a 21.000 m^3 . No obstante, al mismo tiempo, la primera dejaría unos 2.000 m^3 en el parque urbano (con las presas desinfladas) y la segunda unos 5.000 m^3 . En estos resultados influye mucho las anchuras de cauces aluviales que se consideran activas para el transporte de fondo, que se han estimado tras visitar todos los tramos. No sabemos, con precisión, cuánto dejó la crecida del 15 de septiembre de 1999, estimada como de 25 años de periodo de retorno. Sin embargo, en diciembre de 2000, se cubió, aproximadamente, el volumen de material suelto en el cauce principal del parque, que se tenía que haber acumulado desde su inauguración en abril de 1999. Este volumen resultó de 2.540 m^3 y se debe atribuir, en su mayoría, al episodio de septiembre.

8. Experiencia del mantenimiento

Un año después de la inauguración de la fase I, el mantenimiento del río Besòs en los $6,2 \text{ km}$ de intervención fue encomendado a la administración pública Diputación de Barcelona, lo que comprende todos los aspectos del mantenimiento, el uso público, la vigilancia y el seguimiento ambiental, excepto en lo relativo al sistema de información hidrológica y de alerta de evacuación del parque fluvial de Santa Coloma, de lo que se ocupa la empresa Clavegueram de Barcelona, S.A. (Alcantarillado de Barcelona, S.A.).

El seguimiento ambiental ha constatado una recuperación notable de la fauna de peces y de aves. Se ha demostrado que el río Besòs, en el tramo de los humedales, es una etapa para ciertas aves migratorias: para favorecer esta función se deja sin segar en in-

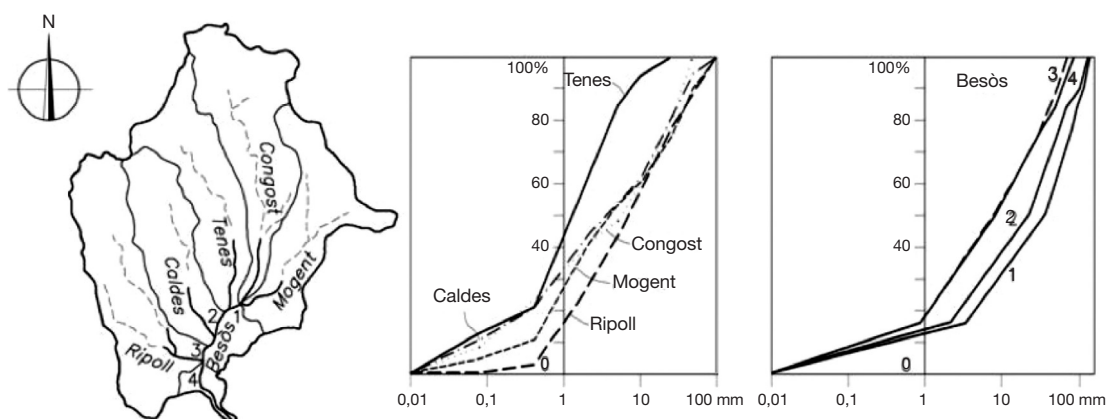


Figura 9. Cuenca del Besòs y curvas granulométricas de los 5 grandes afluentes y de 4 puntos del cauce colector (1-4) señalados en la planta.

vierno una franja ribereña de las parcelas de humedal. También se hace un seguimiento, y a veces una corrección, de la población de larvas de mosquitos, ya que en tiempo caluroso han dado algunas molestias a los vecinos. Entre un 80 y un 90% de las parcelas de humedal siguen funcionando correctamente, y consiguen un tratamiento terciario de las aguas, doce años después de su construcción y a pesar de los episodios de avenida en estos años. Las parcelas colocadas más aguas arriba, las primeras que encuentra el agua, han sido las más castigadas por las avenidas. Así pues, es satisfactoria la valoración de la intervención en cuanto a los objetivos ambientales del tramo superior.

El uso público del parque de Santa Coloma ha sido un gran éxito social. Los paseantes, los caminantes o los ciclistas recorren el parque, las familias pasan la jornada, sobre todo en fin de semana. En consonancia con ello, las presas inflables se hinchaban los fines de semana y se mantienen deshinchadas el resto del tiempo. Esta explotación contribuye a aliviar la acumulación de sedimento en los pequeños embalses. Las presas han necesitado un mantenimiento, pero tras doce años no ha habido que reponer ninguna por cualquier daño posible como la abrasión en las crecidas o el vandalismo. Algunos aspectos del uso público del parque se tratan en Alarcón *et al* [12].

La hierba de las planicies del parque no ha sufrido grandes desperfectos cuando el río ha desbordado de su cauce central. Esto simplifica y abarata su mantenimiento, pues consiste básicamente en la retirada de los objetos flotantes que ha dejado el agua como línea de resaca. Las parcelas de humedal, en cambio, retienen lodos, más suciedad y muchos objetos flotantes. Los lodos pueden restar permeabilidad al substrato filtrante de la parcela y ser obstructivos para los elementos de control (válvulas). La limpieza no mecanizada de las parcelas emplea mucha mano de obra, por lo que no resulta barata. A menudo, hay que rehabilitar también los caminos de acceso a las parcelas. Las acciones de mantenimiento tras un desbordamiento se llaman *correctivas*, mientras las restantes se llaman *preventivas*. Según la frecuencia de desbordamiento, el coste anual del mantenimiento varía, pero un orden de magnitud de todo lo descrito en este apartado es de un millón de euros por año.

9. Lecciones y conclusión

La restauración del río Besòs fue una actuación pragmática de recuperación del río con fuertes acentos sociales y ambientales. El resonante éxito social del parque fluvial, previsible en una zona muy poblada y carente de zonas verdes, puede oscurecer los logros de mejora de la calidad del agua y de población del río con vegetación autóctona (el carrizo). Pero además, estos dos logros ambientales adolecen de un pecado original, pues ni el humedal está bien colocado en el cauce de avenidas de un río torrencial ni el carrizo debería ser un monocultivo, circunscrito a un tramo y excluido del otro.

Los estudios de ingeniería fluvial impulsaron dos avances principales en el conocimiento: cómo representar en un modelo físico (reducido) la vegetación flexible y cómo estimar el volumen sólido de un río teniendo en cuenta su red hidrográfica.

Los objetivos ambientales fueron la cara del proyecto, sirvieron para aprovechar una oportunidad única de financiación, pero esto lastró más tarde su lógica interna. Como en un tropismo, la finan-

ciación moldeó demasiado el resultado. Un proyecto más modesto en recursos podría haber usado la libertad para una restauración más lógica e integrada, pero también, seguramente, menos popular. La demanda de los municipios acumuló fuerzas para conseguir el proyecto, pero luego dispersó las fuerzas al conducir a soluciones diferentes en Montcada y Santa Coloma. El proyecto no tuvo participación pública, pero su resultado (el parque) es muy estimado por la población. ¿Hace falta siempre la participación? La educación ambiental hará que un día la población aprecie, con la misma estima, un parque fluvial más natural que el construido en 1999.

La recuperación de espacio para el río es la asignatura pendiente de la restauración fluvial, en este caso, prácticamente inasequible como consecuencia de la presión metropolitana. Sin embargo, en el corredor disponible, mucho más estrecho que el original, tiene sentido recrear formas y procesos naturales, aunque no sean los originales. Si se conceptúan el arrastre, erosión y depósito de sólidos como fallos de un proyecto, estamos perdiendo el respeto debido a la morfología y la dinámica fluvial en un buen proyecto de restauración fluvial. En todo caso, esta humilde disciplina de lo fluvial no aspira a atraer más que una pequeña parte de la atención, en comparación con la que le es debida a lo ambiental y a lo social, y acaso menor también que la concedida a la ingeniería hidráulica o a la arquitectura del paisaje.

Agradecimientos

A Antoni Alarcón, Marc Montlleó, Antoni Maza, Adriana Sales, Sergi Capapé y Jaume Hernández por su influencia directa en este texto. A todos los citados en trabajos y publicaciones precedentes, vinculados a la UPC. A los ingenieros Manel Pol in *memóriam* y Ferran Puig.

Bibliografía

- [1] Agència Catalana del Agua. Planificació fluvial de la conca del riu Besòs. 2011. <http://aca-web.gencat.cat>.
- [2] Martín-Vide JP. Restoration of an urban river in Barcelona, Spain. *Environmental Engineering and Policy*. 2001;2:113-9.
- [3] Martín-Vide JP, Andreatta A. Disturbance caused by bed sills on the slope of steep streams. *Journal of Hydraulic Engineering ASC*. 2006;132(11):1186-94.
- [4] Martín-Vide JP. Ingeniería de Ríos. 2nd ed. Barcelona: Ed. UPC; 2006.
- [5] Maza Álvarez JA. Manual de Ingeniería de Ríos. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- [6] Leopold LB; Wolman MG, Miller JP. Fluvial Processes in Geomorphology. Dover Publ; 1964.
- [7] Kouwen, N. Modern approach to design of grassed channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*. 1992;118(5):733-43.
- [8] Martín-Vide JP, Moreta PM, López Querol S. Improved 1-D modelling in compound meandering channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Research IAHR*. 2008;46(2):265-76.
- [9] Moreta, PJM, Martín-Vide, JP. Apparent friction coefficient in straight compound channels. *Journal of Hydraulic Research IAHR*. 2010;48(2):169-77.
- [10] Pol M, Alarcón A, Puig F. Recuperación medioambiental del tramo final del río Besòs. OP revista del Colegio de Ing. de C. C. y P. 1999;46:80-5.
- [11] UPC. Estudio del transporte sólido del río Besòs para el proyecto de recuperación medioambiental de su tramo final (fase II). Para CEA y Barcelona Regional, 2000.
- [12] Alarcón A, Montlleó M. Una risorsa per l'area metropolitana. Il restauro ambientale del fiume Besòs, Barcelona. *Archi rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica*. Il fiume e la città; 2011.